

سرشت‌نمایی و طبقه‌بندی معیارهای تعیین محل رصدخانه ژئومغناطیسی و توزیع مکانی آنها در محدوده استان تهران

بهادر شاه‌قبادی^۱، منصوره منتهایی^{۲*}، حجت‌الله^۳ و رنجبر و لقمان نمکی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۴ استادیار، مهندسی معدن، دانشگاه آزاد سنندج، کردستان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳)

چکیده

تعاریف بسیار ضعیف و پراکنده‌ای از معیارهای مکان‌یابی رصدخانه ژئومغناطیسی در متون ژئوفیزیکی وجود دارد. این درحالی است که مکان یک رصدخانه، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت اطلاعات و حجم داده‌های ثبت شده در طی فعالیت آن دارد. مکان‌یابی ناقص یک رصدخانه، اصالت اندازه‌گیری میدان‌های الکترومغناطیسی (EM) انجام شده در آن را متأثر می‌سازد، چراکه دامنه نوبه‌های EM اغلب چندین برابر بزرگتر از دامنه سیگنال‌های اصلی است و امکان حذف این تداخلات در شرایط معمول وجود ندارد. در این پژوهش براساس مطالعات انجام شده برای ارتقاء سطح سیگنال‌ها در سری‌های زمانی میدان‌های EM اندازه‌گیری شده و نیز از بررسی عواملی که منجر به تعطیلی رصدخانه‌ها شده‌اند، مهمترین معیارها برای مکان‌یابی بهینه رصدخانه‌های ژئومغناطیسی استخراج و طبقه‌بندی شدند.

تمرکز تأسیسات زیرساختی، مراکز حیاتی، نظامی و اقتصادی وابسته به انواع تجهیزات الکترونیکی در استان تهران از یک‌سو آن را در معرض انبوهی از نوبه‌های EM قرار داده و از سوی دیگر ضرورت احداث رصدخانه ژئومغناطیسی که داده‌های آن موجب ارتقای مدل‌های پیشبینی مخاطرات طبیعی (زلزله، طوفان‌های مغناطیسی، تغییرات آب و هوایی، اقلیمی) و در نتیجه ارتقای تاب‌آوری منطقه‌ای در استان تهران می‌شوند را برجسته می‌سازد. به این دلیل در بخش آخر این مقاله، ساختار سلسله مراتبی پیشنهاد شده در بخش اول به کار گرفته شده و چگونگی توزیع معیارهای مکان‌یابی رصدخانه ژئومغناطیس در سرتاسر استان تهران به تفصیل بررسی شده است.

کلمه‌های کلیدی: رصدخانه ژئومغناطیسی، نوبه‌های الکترومغناطیسی، مخاطرات طبیعی، معیارهای مکان‌یابی، تهران

۱ مقدمه

رصدخانه‌های ژئومغناطیسی به‌عنوان پایگاه‌های اصلی ثبت دقیق و پیوسته میدان مغناطیسی زمین، نقش اساسی در پایش تغییرات میدان ژئومغناطیس دارند. ثبت منظم و گسترده این داده‌ها از قرن هفده میلادی در اروپا و آمریکا آغاز شده و تا کنون ادامه یافته است. با گسترش اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای که میدان ژئومغناطیس را در یک شبکه جهانی منظم ثبت می‌کنند، نه تنها از اهمیت برداشت‌های رصدخانه‌ای کاسته نشد بلکه به‌علت عدم حساسیت اندازه‌گیری‌های زمینی (نسبت به داده‌های ماهواره‌ای) به تغییرات مکانی ناگهانی میدان ژئومغناطیس و نیز کاربرد گسترده داده‌های باکیفیت رصدخانه‌ای برای کالیبراسیون در محل داده‌های ماهواره‌ای، نیاز به اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای افزایش یافت (مانند آ و کورته، ۲۰۱۰). در واقع رصدخانه‌های مغناطیسی ستون فقرات پایش تغییرات زمانی میدان ژئومغناطیس و ارزیابی سطح فعالیت‌های الکترومغناطیسی در یک منطقه هستند. عدم وجود آنها صرفاً به معنی نبود یک مرکز علمی نیست بلکه باعث می‌شود تا امکان شناسایی آشفتگی‌های مغناطیسی ناشی از شکستگی سنگ‌ها در فاز مقدماتی زمین‌لرزه‌ها و یا ناشی از تغییر سطح فعالیت مغناطیسی خورشید (مؤثر در تولید پرتوهای کیهانی و ایزوتوپهای ترکیبات اتمسفری) شناسایی نشده و در نتیجه پیش‌بینی مخاطراتی مثل زلزله، طوفان‌های مغناطیسی، تغییرات آب و هوایی، اقلیمی و یا حتی تهیه نقشه‌های ناوبری حاوی سطح بالایی از خطای سوگیری باشند (مانند آ و کورته، ۲۰۱۰؛ رونگ-آرونو و همکاران، ۲۰۱۷). به گونه‌ای که پیچیدگی‌های مدیریت بهینه کلان‌شهرهایی مانند تهران بزرگ را افزایش داده و تاب‌آوری شهری را کاهش می‌دهد.

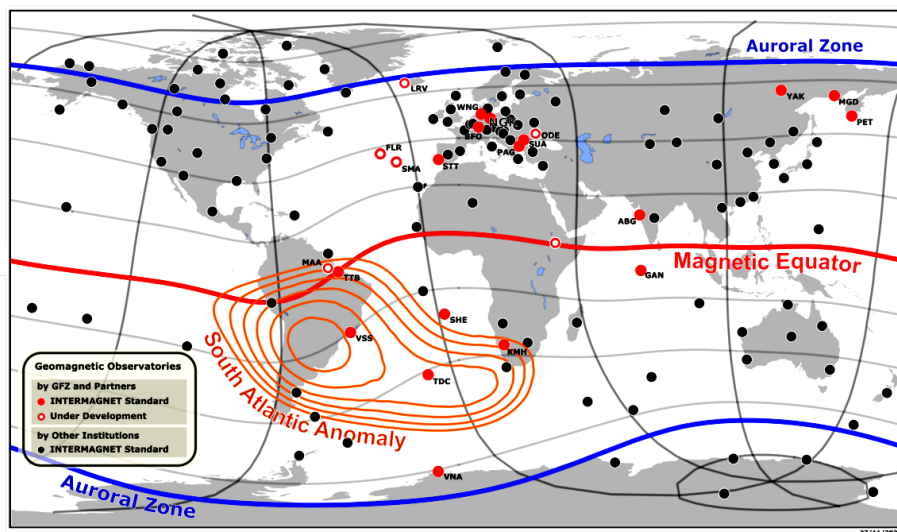
پراکندگی جغرافیایی رصدخانه‌های ژئومغناطیسی در سرتاسر کره زمین در شکل ۱ نمایش داده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود منطقه غرب آسیا از نظر وجود چنین ایستگاه‌های اندازه‌گیری بسیار تنگ است. رصدخانه ژئومغناطیسی تهران در دهه شصت میلادی در دامنه رشته کوه البرز تأسیس و گزارش‌های علمی آن از سال ۱۹۶۰ به مجامع بین‌المللی ارائه شده است (کشی‌افشار، ۱۹۶۰؛ حسین‌زاده گویا، ۱۹۹۴). اما این رصدخانه به علت گسترش کلانشهر تهران در معرض نوفه‌های الکترومغناطیسی متعدد قرار گرفته و باعث شده تا داده‌های آن فاقد کیفیت لازم برای ثبت در پایگاه‌های داده جهانی باشند. به‌منظور حل این مشکل ضروری است تا تجهیزات رصدخانه‌ای به مکان مناسبی منتقل شوند. علیرغم ضرورت آشکار این موضوع، مطالعات بسیار محدودی در این زمینه انجام شده است. حسین‌زاده گویا (۱۳۷۹) از برداشت‌های شدت کل میدان مغناطیسی در ۱۴ شهر ایران، پنج نقطه را برای راه‌اندازی رصدخانه ژئومغناطیسی پیشنهاد نمود. یزدان آبادی و همکاران (۲۰۱۷) از بررسی عوامل منجر به تعطیلی رصدخانه‌ها، ۱۱ معیار را برای تعیین محل رصدخانه پیشنهاد دادند و از بررسی و تلفیق توزیع مکانی آنها در محدوده استان کرمان، سرانجام هفت منطقه را در سرتاسر این استان برای تأسیس رصدخانه ژئومغناطیسی تعیین نمودند.

کارآیی بهینه رصدخانه ژئومغناطیسی زمانی حاصل می‌شود که مؤلفه‌های میدان اندازه‌گیری شده در آنها دقیقاً بیانگر میدان مغناطیسی زمین و تغییرات زمانی آن باشند. اما مجاورت محل رصدخانه ژئومغناطیسی به انواع دیگر از مولدهای میدان‌های EM باعث می‌شود تا ثبت‌های رصدخانه‌ای به دلیل اختلاط با این میدان‌های مزاحم از دقت لازم برای نمایش مقادیر واقعی میدان ژئومغناطیس برخوردار نبوده و به اصطلاح به نوفه آلوده شوند. بنابراین تدوین معیار برای انتخاب مکان مناسب رصدخانه طوریکه اندازه‌گیری‌های آن برای بررسی میدان ژئومغناطیس و تغییرات آن معتبر و سودمند باشند،

می‌شوند، معیارهای تعیین مکان رصدخانه ژئومغناطیسی استخراج شوند. در بخش بعد با توجه به ضرورت مکان‌یابی رصدخانه ژئومغناطیسی در محدوده استان تهران، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به چگونگی توزیع مکانی معیارها در محدوده این استان تحلیل و بررسی شده‌اند.

اجتناب‌ناپذیر است (مارتین و همکاران، ۲۰۲۴). در این پژوهش سعی شده است، با سرشت‌نمایی انواع نوفه‌هایی که کیفیت اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای را مغشوش می‌سازند و نیز از بررسی عواملی که با مختل ساختن اندازه‌گیری‌ها، تاب‌آوری عملیاتی رصدخانه‌ها را کاهش داده یا از بین می‌برند و باعث عدم یکپارچگی و قطع داده



شکل ۱. نقشه توزیع مکانی رصدخانه‌های ژئومغناطیسی در سرتاسر کره زمین (GFZ).

زمین‌شناسی و تکتونیکی (مثل پایش زلزله با دامنه نوسانات EM بسیار ضعیف). محل رصدخانه‌ها را باید به نحوی تعیین کرد که از دو عامل آخر دور باشد (شارکا، ۱۹۸۸). علاوه بر این، یکی از وظایف اصلی رصدخانه‌های ژئومغناطیسی پایش تغییرات طولانی مدت میدان ژئومغناطیس، مؤثر در مطالعات مگنتوهیدرودینامیک هسته زمین است. در عمل این به معنی ضرورت ثبات مکانی این ایستگاه‌های اندازه‌گیری برای بازه‌های زمانی چند صد ساله است. همچنین باید توجه داشت که دستگاه‌های رصدخانه‌ای بسیار گران‌قیمت و آسیب‌پذیر هستند. تأمین این شرایط لازم می‌دارد تا محل رصدخانه ژئومغناطیسی از مخاطرات

۲ لایه‌های اطلاعات مکانی لازم برای تعیین محل رصدخانه ژئومغناطیسی

اعتبار اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای به نسبت سیگنال به نوفه ثبت شده در این ایستگاه‌ها وابسته است. مولدهای نوفه EM مؤثر بر این اندازه‌گیری‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: نوفه‌های ابزاری، نوفه‌های EM طبیعی (ناشی از عوارض زمین‌شناسی و پدیده‌های اتمسفری) و نوفه‌های EM مصنوعی ناشی از میدان‌های اغتشاش حاصل از پیشرفت انواع فن‌آوری‌ها. با انتخاب صحیح مکان رصدخانه از اثر مخرب دو عامل آخر، می‌توان اجتناب کرد. به‌منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه در ثبت‌های رصدخانه‌ای و نیز به‌منظور استخراج اطلاعات

ژاپن ۶۰ هرتز است (شکل ۲الف). خطوط انتقال برق سه‌فاز حاوی سه رسانای مجزا حامل سیگنالهایی با اختلاف فاز یک‌سوم سیکل هستند. مجموع جبری این سه جریان فاز در حالت ایده‌آل که سیستم توزیع قدرت متعادل است، صفر است. اما در عمل سیستم توزیع قدرت به‌علت بارهای متفاوت متصل به این سه فاز، متعادل نبوده و یک جریان خالص برگشتی در سیم نول موجود در این سیستم شکل می‌گیرد که منبع اصلی نوفه EM برای اندازه‌گیری‌های ژئومغناطیسی است (فرگوسن، ۲۰۱۲). توان این دسته از نوفه‌ها 30-50 db فراتر از توان سیگنال‌های طبیعی است و هارمونیک‌های اصلی و فرعی آن در نمودار طیف توان میدان‌های EM همواره حضور دارند (شکل ۲ب). اگرچه با استفاده از فیلتر شکاف (از انواع فیلترهای میان‌گذر) امکان حذف این دسته از نوفه‌ها وجود دارد، اما نزدیک بودن ایستگاه‌های اندازه‌گیری به خطوط انتقال برق، ممکن است باعث اشباع اجزاء الکترونیکی دستگاه‌های اندازه‌گیری شود. قوی‌ترین اثر این نوفه‌ها در اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای بر نگاشت‌های مؤلفه قائم میدان مغناطیسی و نیز مؤلفه‌ای از میدان الکتریکی که به موازات خطوط انتقال برق است، مشاهده می‌شود. مطالعه شدت میدان‌های EM در مجاورت یک کابل انتقال برق فشار قوی سه‌فاز نشان داده است که بیشینه دامنه این نوفه‌ها تا فاصله ۵۰ متری از این کابل رخ می‌دهد و در فاصله ۲۰۰ متری از آن اثر مخرب نوفه‌ها از بین رفته است (شکل ۲ج). اتصالات شبکه قدرت به خانه‌ها و سایر تأسیسات از طریق کابل‌های انتقال برق تک‌فاز صورت می‌گیرد که در مقایسه با کابل‌های سه‌فاز، نوفه‌های EM بسیار قوی‌تری تولید می‌کنند. رعایت فاصله پنج کیلومتر از این کابل‌ها به‌منظور اجتناب از نوفه‌های EM ناشی از آنها ضروری است (شارکا، ۱۹۸۸).

زمین‌شناسی و تکتونیک موصون باشد. بنابراین تعیین مکان رصدخانه ژئومغناطیسی مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان اطلاعات مکانی معیارهای مختلفی است که در یک نگاه کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: (الف) نوفه‌های EM مصنوعی، (ب) نوفه‌های EM طبیعی و (ج) مخاطرات طبیعی. در ادامه این معیارها و نحوه اثر آنها بر اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای به تفصیل بررسی می‌شوند.

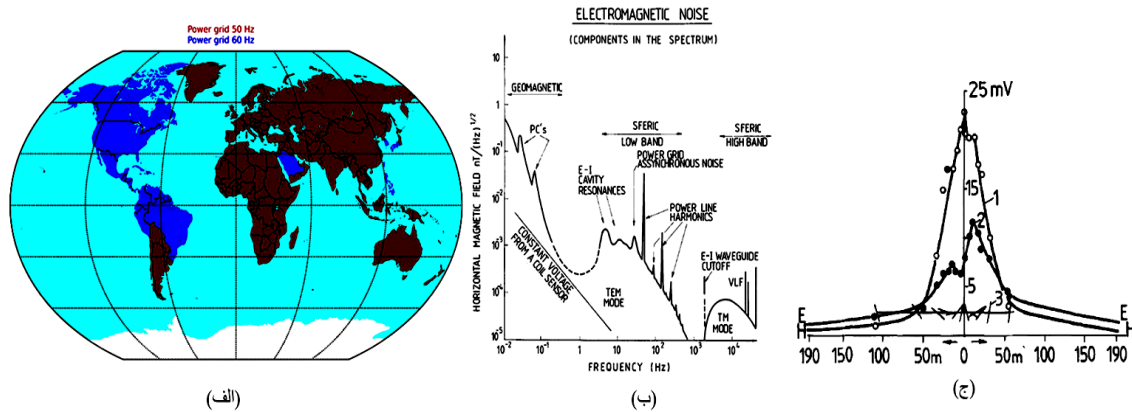
۱-۲ نوفه‌های EM مصنوعی

هروسیله مصرف‌کننده جریان الکتریسته، یک مولد نوفه EM مصنوعی محسوب می‌شود. در نواحی پرجمعیت این نوفه‌ها در اغلب موارد قطبیده و انرژی آنها چندبرابر سیگنال‌های طبیعی است. این نوفه‌ها به دو گروه (الف) فعال و (ب) غیرفعال تقسیم می‌شوند. گروه (الف) ناشی از مولدهای اولیه‌ای هستند که سیگنال‌های مخرب نوفه را راه‌اندازی کرده‌اند. اثر این نوفه‌ها دائمی نبوده و به‌شکل ضربه‌هایی گذرا روی ثبت‌های مگنتوگرام ظاهر می‌شوند. این درحالی است که گروه (ب) اثر ثانویه‌ای ناشی از القای الکترومغناطیس در خطوط لوله‌های فلزی مدفون یا نرده‌های حفاظ فلزی هستند (سانتارلی و همکاران، ۲۰۱۴). در ادامه انواع مولدهای نوفه‌های EM آلوده‌کننده داده‌های رصدخانه‌ای بررسی شده‌اند.

۱-۱-۲ خطوط سه‌فاز و تک‌فاز انتقال در شبکه

برق‌رسانی

فراگیرترین نوفه EM مصنوعی توسط خطوط انتقال برق فشار قوی سه‌فاز و نیز خطوط توزیع برق ولتاژ متوسط تک‌فاز موجود در شبکه برق‌رسانی ایجاد می‌شود. عملکرد مطلوب سیستم قدرت (شامل تولید، انتقال، توزیع و کنترل) به ثبات فرکانس نامی جریان متناوب AC موجود در این خطوط وابسته است. مقدار این فرکانس نامی در ایران و اروپا ۵۰ هرتز و در آمریکای شمالی و



شکل ۲. (الف) نقشه جهانی از شبکه برق‌رسانی که توسط فرکانس نامی ۵۰ هرتز (نواحی قرمز رنگ) و یا ۶۰ هرتز (نواحی آبی رنگ) به توان رسیده‌اند (نیکارتز و همکاران، ۲۰۱۶). (ب) طیف توان مؤلفه افقی میدان مغناطیسی که در آن هارمونیک‌های خط انتقال برق در کنار پارازیت‌های جوی حضور دارند (شارکا، ۱۹۸۸). (ج) نوفه‌های EM که در مجاورت کابل فشار برق سه‌فاز در شدت میدان مغناطیسی (دوایر توخالی)، میدان الکتریکی افقی (دوایر توپر) و جهت‌های بردار میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود (فرگوسن، ۲۰۱۲).

کسرهای صحیح از آنها (مثل کسر دوم و سوم ۵۰ هرتز که به ترتیب ۲۵ و ۱۶/۶۶ هرتز است) استفاده می‌کنند. شکل (۳ ب) طیف توان مؤلفه شمال‌سوی میدان ژئومغناطیس را در دو ایستگاه نزدیک به شهر گوتینگن در آلمان و ۳۰ کیلومتر دورتر از آن (ایستگاه سیلبربورن) نشان می‌دهد. هر دو این طیف‌ها در ۱۶/۶۶ هرتز پیک مشخص و واضحی را مطابق با حرکت قطار شهری نشان می‌دهند که تا 60 db فراتر از بخش پیوستار طیف است. نکته مهمتر حضور هارمونیک‌های فرعی این نوفه در فرکانس‌های ۶.۲۵ و ۱۲.۵ هرتز در نمودار طیف توان مربوط به ایستگاه گوتینگن است که به ترتیب به کسرهای هشتم و چهارم از فرکانس جریان متناوب در شبکه برق این شهر مربوط هستند. این هارمونیک‌های فرعی ممکن است توسط کنترل ولتاژ ژنراتورهای الکتریکی و یا تأسیسات گرمایشی ایجاد شده باشند. نکته قابل توجه، عدم حضور این نوفه‌های EM مصنوعی در طیف توان ایستگاه سیلبربورن است. در عوض در طیف توان این ایستگاه که از هرگونه ناحیه صنعتی دور است، سیگنال‌های طبیعی ناشی از تشدیدهای شومن (نوسانات موج بر زمین-یونوسفر حاصل از طوفان‌های تندر

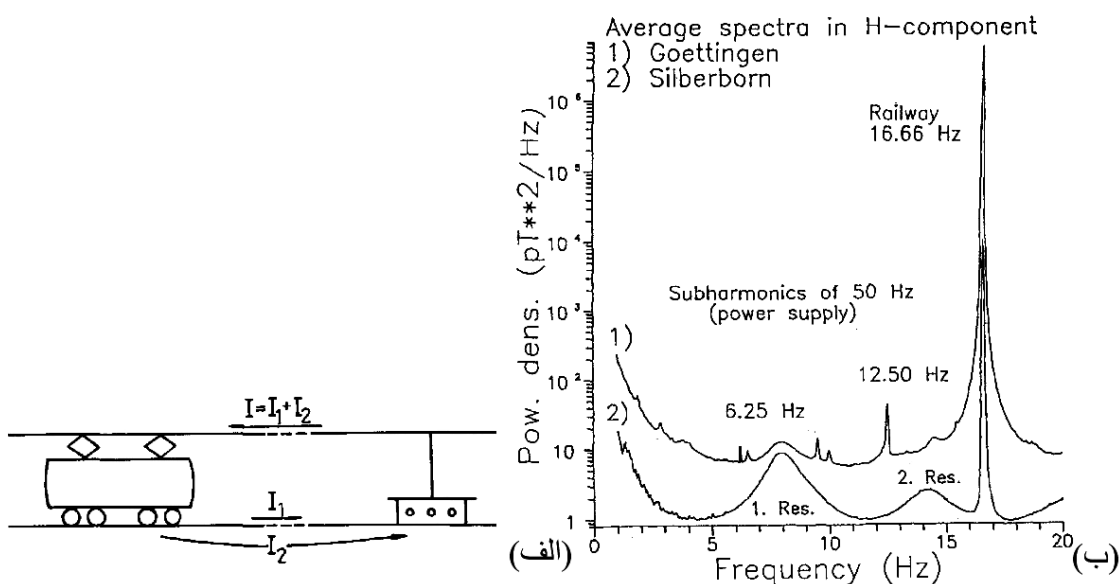
۲-۱-۲ خطوط راه‌آهن

سیستم‌های راه‌آهن الکتریکی مشکلات اساسی در اندازه‌گیری میدان‌های EM ایجاد می‌کنند (شارکا، ۱۹۸۸). این سیستم‌ها در کاربردهای شهری و محلی از سیستم‌های قدرت DC و در مسافت‌های طولانی از سیستم‌های قدرت AC و یا DC استفاده می‌کنند. شکل ۳ (الف) مدار معادل یک قطار برقی شهری را نشان می‌دهد. این مدار شامل خط انتقال برق هوایی (در بالای سر قطار) و ریل‌های اصلی واقع بر زمین است. اگر عایق‌بندی ریل‌ها کاملاً ایده‌آل انجام شده باشد، جریان الکتریکی درون ریل‌ها (I_1) و خط انتقال برق هوایی (I) یکسان بوده و میدان‌های EM ناشی از آنها در طی فواصل چند کیلومتری خنثی می‌شوند. اما در عمل عایق‌بندی ریل‌ها تکمیل نبوده و نشأت جریانی قابل توجهی (جریان I_2) بین ریل‌ها و زمین رخ می‌دهد. در نتیجه حرکت قطار بین نقاط متصل به زمین بر روی ریل‌ها، توزیع جریان در ریل‌ها تغییر کرده و نوفه‌های EM که برداشت‌های میدان ژئومغناطیس را مخدوش می‌سازند، ایجاد می‌شوند. سیستم‌های قدرت در این قطارها از کابل‌های انتقال برق تک‌فاز با فرکانس جریان متناوب ۵۰ یا ۶۰ هرتز و یا

کیلومتر دورتر از آنها اندازه‌گیری‌های میدان ژئومغناطیس را مخدوش سازد (فرگوسن، ۲۰۱۲). اما به‌طور متوسط رعایت فاصله 10-30 km از راه‌آهن‌های الکتریکی به‌منظور اجتناب از نوفه‌های EM ناشی از آنها ضروری است (خوموتوف و همکاران، ۲۰۱۷؛ یانکوفسکی و ساکسدورف، ۱۹۹۶).

بزرگ‌مقیاس) در فرکانس‌های ۸ و ۱۴ هرتز مشاهده می‌شوند. عدم شناسایی این سیگنال‌های طبیعی بر روی طیف توان میدان مغناطیسی در ایستگاه گوتینگن بیانگر افزایش سطح نوفه صنعتی با ماهیت محتمل باند پهن است (یونگه، ۱۹۹۶).

برحسب اینکه مقاومت ویژه پوسته بالایی چه باشد، نوفه ناشی از راه‌آهن‌های الکتریکی ممکن است تا صدها



شکل ۳. (الف) مدار جریان در سیستم‌های ریلی برقی (شارکا، ۱۹۸۸). (ب) طیف توان مؤلفه Bx میدان ژئومغناطیس در دو ایستگاه (۱) گوتینگن و (۲) سیلبربورن در فاصله 30 km از گوتینگن (یونگه، ۱۹۹۶).

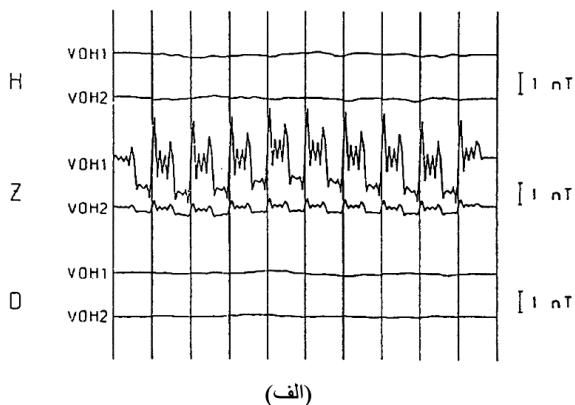
شکل (۴الف) اثر این نوفه بر مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده میدان مغناطیسی را در دو ایستگاه واقع در فواصل ۹۰ (VOH1) و ۴۹۰ متری (VOH2) از یک خط لوله مدفون، نشان می‌دهد. اثر این نوع از نوفه‌ها صرفاً در مؤلفه قائم میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود. به‌علاوه، کاهش دامنه سیگنال با افزایش فاصله به وضوح با قانون وابستگی میدان مغناطیسی ناشی از یک سیم حامل جریان با عکس فاصله، منطبق است (یونگه، ۱۹۹۶).

اما دسته دیگری از این نوفه‌های EM مصنوعی مرتبط با خطوط لوله‌کشی‌های مدفون وجود دارند که اثر پایدارتری بر ثبت‌های میدان‌های EM باقی می‌گذارند.

۲-۱-۳ خطوط لوله‌کشی مدفون

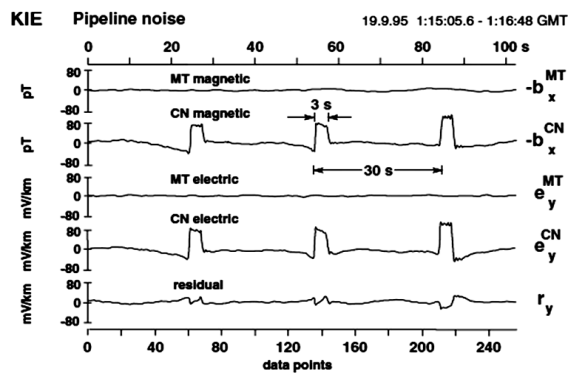
همه خطوط فلزی مدفون در خاک (مثل خطوط انتقال نفت و گاز) در کنار پوشش‌های عایقی که دارند از سیستم‌های محافظت کاتودی برای جلوگیری از خوردگی الکتروشیمیایی به‌عنوان یک لایه محافظتی مضاعف استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها با ایجاد یک جریان الکتریکی کنترل شده، لوله را به کاتد تبدیل کرده و از خوردگی آن جلوگیری می‌کنند. دامنه این سیگنال‌ها در نزدیکی خطوط لوله مدفون از مرتبه 10 nT بوده، با دور شدن از آن به‌طور خطی کاهش می‌یابد و نهایتاً مقدار آن در فاصله ۵۰۰ متری به مقادیر بسیار پایینی می‌رسد.

(اوتینگر و همکاران، ۲۰۰۱). شکل (۴ب) اثر این دسته از نوفه‌ها را بر روی مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نشان می‌دهد. ولتاژ تست براساس سری‌های زمانی در این شکل به مدت سه ثانیه برقرار شده و سپس برای مدت ۲۷ ثانیه قطع شده است.



(الف)

درواقع وضعیت یکپارچگی پوشش خطوط لوله و نیز عملکرد سیستم حفاظت کاتدی با تزریق یک ولتاژ آزمایشی بزرگ به خط لوله به‌طور منظم و دوره‌ای ارزیابی می‌شود. در حین اتصال و قطع این ولتاژ تست، نوفه‌های EM مصنوعی ایجاد می‌شوند که تا چند ده کیلومتر دورتر از خطوط لوله قابل مشاهده هستند



(ب)

شکل ۴. (الف). بازه ۱۰ دقیقه‌ای از تغییرات زمانی مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در دو ایستگاه به فاصله ۹۰ متر (VOH1) و ۴۹۰ متر (VOH2) از یک خط لوله که حفاظت کاتدی شده است (یونگه، ۱۹۹۶). (ب) سری‌های زمانی مؤلفه شرق‌سوی میدان الکتریکی (ey) و مؤلفه شمال‌سوی میدان مغناطیسی (bx) پس از فرآیند پردازش داده‌ها و تفکیک اثرات نوفه (CN) از سیگنال‌های اصلی (MT) (اوتینگر و همکاران، ۲۰۰۱).

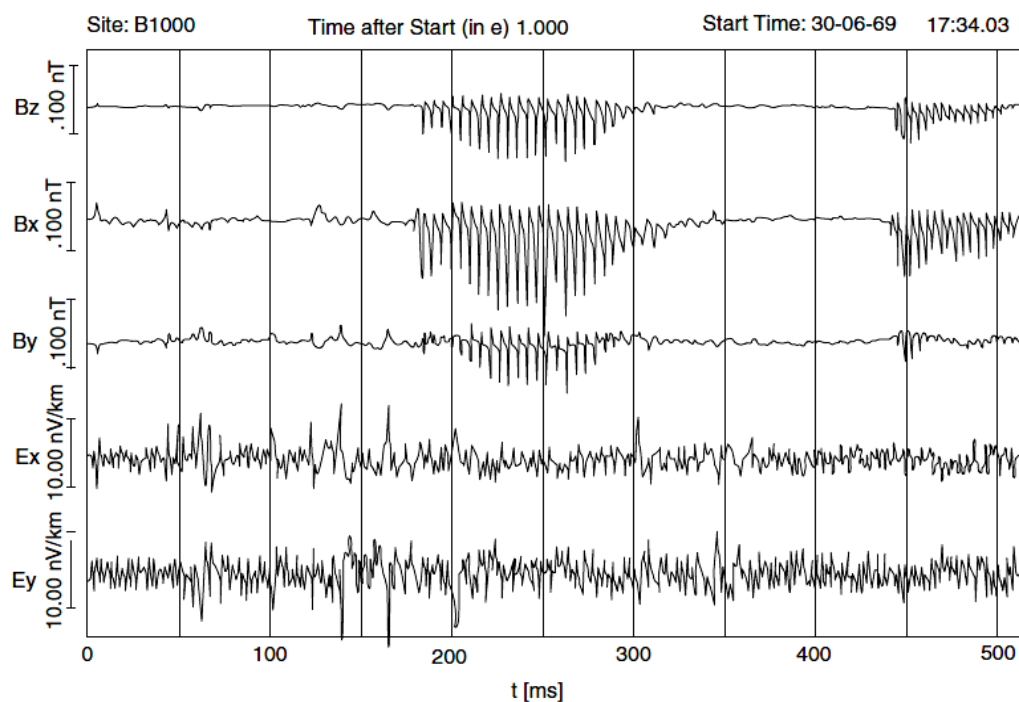
نظامی انجام شوند (فرگوسن، ۲۰۱۲).

۲-۱-۴ سیستم‌های مخابرات رادیویی

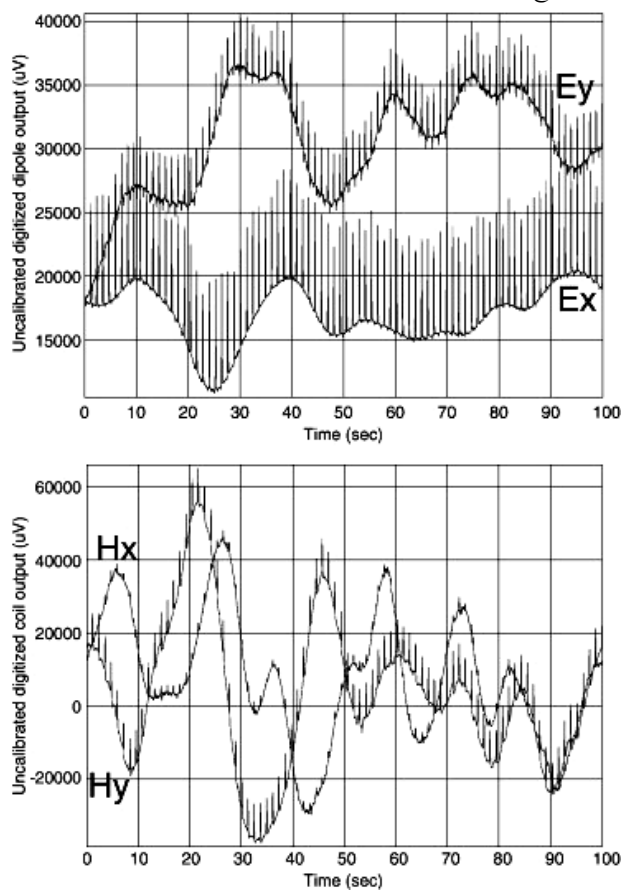
نوفه‌های EM مصنوعی ناشی از سیگنال‌های ارسالی امواج رادیویی در طی فرآیند مدولاسیون این امواج (تلفیق اطلاعات بر روی امواج رادیویی با تغییر دامنه، فاز و یا فرکانس آنها) و یا در نتیجه تداخل این سیگنالها با الکترونیک دستگاه‌های اندازه‌گیری میدان‌های EM ایجاد می‌شود. شکل ۵ اثر سیگنال‌های یک رادار نظامی را بر روی سری‌های زمانی میدان‌های EM نشان می‌دهد. این داده‌ها حاوی هم اثر نرخ تکرار پالس (PRF) آنتن رادار (معمولاً کمتر از 100 Hz) و هم فرکانس اسکن دورانی آنتن هستند (یونگه، ۱۹۹۶). به‌منظور اجتناب از اثر مخرب این دسته از نوفه‌های رادیویی توصیه می‌شود که اندازه‌گیری میدان‌های EM در فواصل دورتر از 5 Km از منابع ارتباطات رادیویی، خصوصاً تأسیسات

۲-۱-۵ نرده‌های حفاظ الکتریکی

یک پالس ولتاژ بالا با دوره زمانی بسیار کوتاه 10 μ s در هر یک ثانیه یا دو ثانیه به این نوع نرده‌های حفاظ اعمال می‌شود. یکی از خروجی‌های این مولد پالس به حفاظ نرده‌ای متصل بوده و خروجی دوم به میله‌ای متصل به زمین، وصل می‌شود. وقتی موجودی (یک حیوان یا انسان) با نرده تماس پیدا کند، مدار بسته و تکمیل شده و شوک مؤثری به آن اعمال می‌شود. اندازه‌گیری‌های میدان ژئومغناطیس در نتیجه میدان‌های EM ناشی از این پالس به شدت مخدوش می‌شوند (شکل ۶). رعایت فاصله 3-5 Km از این نرده‌ها در اندازه‌گیری میدان‌های EM به‌منظور اجتناب از نوفه ناشی از آنها ضروری است (فرگوسن، ۲۰۱۲).



شکل ۵. اثر اسکن دورانی و نرخ تکرار پالس یک آنتن رادار بر روی سری‌های زمانی مؤلفه‌های میدان مغناطیسی (فرگوسن، ۲۰۱۲).



شکل ۶. نوفه‌های ولتاژ بالا با دوره تناوبی بسیار کوتاه ناشی از یک حفاظ نرده‌ای الکتریکی که بر سیگنال‌های اصلی میدان‌های EM قرار گرفته‌اند

(اشتاگپول و همکاران، ۲۰۰۹).

۲-۱-۶ جاده‌ها، صنایع فعال (معادن، کارخانه‌ها

و ... و سایر مولدهای نوفه‌های EM مصنوعی

حرکت نسبتاً آرام وسایل نقلیه به‌عنوان اشیاء آهنی پیچیده و مهندسی شده باعث ایجاد نوساناتی در میدان ژئومغناطیسی می‌شود که اثر القایی ناشی از آنها، اندازه‌گیری‌های میدان‌های EM در مجاورت جاده‌ها را مخدوش می‌سازد. دامنه این نوفه‌ها به چند هزار $\mu A/m$ می‌رسد و دامنه نوسانات آنها بین 0.01-0.3 Hz گزارش شده است (ریو و همکاران، ۲۰۲۴). به‌منظور اجتناب از این نوفه‌ها ضروری است تا ایستگاه‌های اندازه‌گیری میدان‌های EM در فاصله 100 m از جاده‌های محلی و در فاصله 250-500 m از جاده‌های اصلی و بزرگراه‌ها قرار گیرند (فرگوسن، ۲۰۱۲).

سیگنال‌دهی‌های مخابراتی که به‌منظور برقراری ارتباط معدن‌کاران و کارگران استفاده می‌شود، سیستم‌های لوله‌کشی، شبکه‌های برق‌رسانی، کابل‌ها و سایر ابزارآلات الکترونیکی مورد استفاده در صنایع و معادن، مهمترین عوامل تقویت سطح نوفه‌های الکترومغناطیسی در معادن فعال و کارخانه‌های صنعتی هستند (شارکا، ۱۹۸۸).

فن‌آوری‌های نوین مبنی بر مدارهای الکترونیکی متعدد و جریان AC درون آنها هستند. به همین علت در مجاورت شهرهای بزرگ و نواحی صنعتی با برهم‌نهی از انواع نوفه‌های EM مصنوعی مواجه هستیم. در نواحی روستایی نیز سطح نوفه‌های EM مصنوعی توسط انواع مختلف پمپ‌ها و ژنراتورها افزایش می‌یابد. به همین دلیل، رعایت فاصله امن ۱۵ کیلومتری از شهرهای بزرگ و ۲-۳ کیلومتری از روستاها برای تعیین محل رصدخانه ژئومغناطیسی توصیه شده است (وینرت، ۱۹۷۰).

۲-۲ نوفه‌های EM طبیعی

تغییرات مکانی خودپذیری مغناطیسی و هدایت ویژه

الکتریکی در محدوده پوسته بالایی زمین می‌تواند مولد تغییرات میدان‌های EM ناخواسته‌ای باشد که ثبت تغییرات آهسته و زودگذر میدان ژئومغناطیس در رصدخانه‌ها را مخدوش می‌سازند. مهمترین عوارضی که چنین تغییراتی را ایجاد می‌کنند، عبارتند از: توده‌های بی‌هنجار مغناطیسی پراکنده در پوسته زمین، توپوگرافی و خطوط ساحلی.

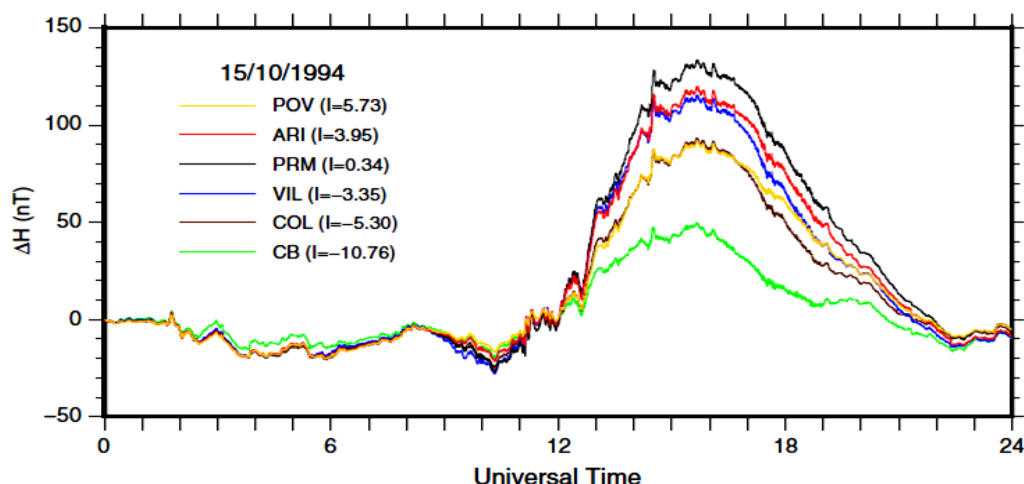
۲-۲-۱ بی‌هنجاری‌های الکترومغناطیسی پوسته

زمین

کارکرد اصلی رصدخانه‌های ژئومغناطیسی، ثبت تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت میدان مغناطیسی زمین به‌گونه‌ای است که داده‌های آن بتواند به‌عنوان نماینده یک حوزه جغرافیایی وسیع پیرامون آن ایستگاه عمل کند. اما وجود بی‌هنجاری‌های الکترومغناطیسی وسیع و گسترده (مانند کراتون آفریقا یا پشته‌های میانی اقیانوس اطلس)، دامنه تغییرات میدان ژئومغناطیسی را به‌شدت تغییر داده، تقویت یا تضعیف می‌کند (شکل ۷) طوریکه با شاخص‌های جهانی مثل اندیس ژئومغناطیسی Dst همخوان نباشند (پادیلها و همکاران، ۲۰۱۷). این امر منجر به مختل شدن شناسایی طوفان‌های مغناطیسی بر روی رکوردهای مگنتوگرام و مدل‌سازی‌های یونوسفری می‌گردد. همچنین، تفسیرهای تکنونیک‌ی به دلیل همخوانی ضعیف با شواهد زمین‌شناسی، ناکارآمد می‌گردند. به همین دلیل، استانداردهای مکانیابی رصدخانه‌ها ایجاد می‌کنند که در پیرامون محل استقرار آنها مؤلفه‌های میدان الکترومغناطیس یکنواخت (همگن) بوده و بیشینه دامنه میدان بی‌هنجاری مغناطیسی کمتر از 50 nT باشد (یانکوفسکی و ساکسدورف، ۱۹۹۶؛ وینرت، ۱۹۷۰).

۲-۲-۲ توپوگرافی سطح زمین

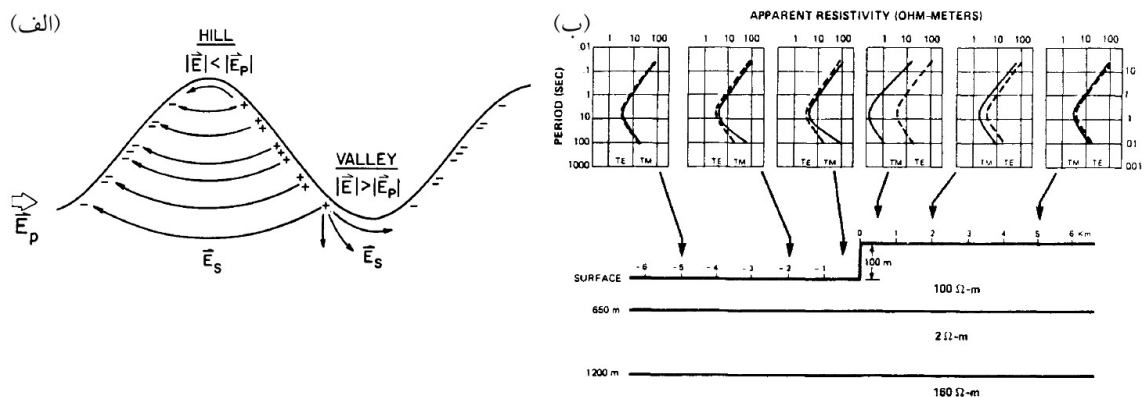
هندسه سطح ناهمواری‌های توپوگرافی، یک تقابل



شکل ۷. مؤلفه شمال‌سوی میدان ژئومغناطیس که در طی یک روز آرام مغناطیسی توسط مجموعه‌ای از رصدخانه‌ها در آمریکای جنوبی نزدیک به استوای مغناطیسی ثبت شده‌اند. اگرچه مطابق با ویژگی تغییرات روزانه، بیشینه این مؤلفه میدان در همه ایستگاه‌ها حدود ظهر (15:40 UT □ مطابق با 11:40 LT) رخ داده است اما دامنه این تغییرات در ایستگاه CB واقع بر یک بی‌هنجاری الکترومغناطیسی وسیع به طول 1200 Km به مراتب کمتر از سایر ایستگاه‌ها است (پادیلها و همکاران، ۲۰۱۷).

ایجاد می‌کنند که جهت آن کاملاً مماس با سطح زمین است (شکل ۸ الف). تحلیل ریاضی-فیزیکی مسئله اعوجاج جریان‌های تلوریک ناشی از توپوگرافی سطحی نشان می‌دهد که این میدان‌ها بر فراز تپه‌های توپوگرافی تضعیف و در دره‌ها به دلیل اثر گالوانی تقویت می‌شوند (فرگوسن، ۲۰۱۲). همچنین مدل‌سازی عددی این آثار اعوجاجی نشان می‌دهند که با دور شدن از محل رویداد این تغییر ارتفاع، سطح آثار اعوجاجی کاهش یافته و در فاصله پنج کیلومتری از آن ناپدید می‌شوند (شکل ۸ ب).

مقاومت ویژه الکتریکی جانبی در مرز هوا و زمین ایجاد می‌کند که زمینه‌ساز انباشت بار الکتریکی آزاد بر سطح این ناهمواری‌ها است. میزان این بار الکتریکی تجمع یافته متناسب با شیب ناهمواری سطحی بوده و بیشینه آن در نقاطی رخ می‌دهد که شیب سطح، بیشینه است (ژیراسک، ۱۹۹۰). میدان الکتریکی ناشی از این بارها (E_s) با میدان الکتریکی زمینه موجود در منطقه (E_p) تجمع شده و میدان الکتریکی گالوانی کل و الگوی شارش جریان الکتریکی را در زیر ناهمواری سطحی



شکل ۸. (الف) اعوجاج میدان‌های الکترومغناطیسی در نتیجه ناهمواری‌های سطحی توپوگرافی. (ب): توزیع بارهای الکتریکی و میدان الکتریکی ثانویه (E_s) ناشی از ناهمواری‌های توپوگرافی (ژیراسک، ۱۹۹۰).

۲-۲-۳ خطوط ساحلی

اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی چشمگیری که بین خشکی و آب شور دریا در نواحی ساحلی وجود دارد باعث می‌شود تا جریان‌های تلوریک ناشی از القای ژئومغناطیس در آب‌های ساحلی مجتمع شده و میدان‌های مغناطیسی قوی، عمود بر خط ساحلی ایجاد شوند. این میدان بی‌هنجار الکترومغناطیسی در دوره‌های تناوبی کوتاه ($>0.01 \text{ sec}$) تا فاصله‌ای در حدود چند ده کیلومتر از ساحل و در دوره‌های تناوبی طولانی‌تر ($<100 \text{ sec}$) تا فاصله‌ای بالغ بر چند صد کیلومتر از ساحل قابل اندازه‌گیری هستند (چیو و جونز، ۲۰۱۴). به همین علت، دستورالعمل‌های پرستناد رصدخانه‌ای الزام می‌کنند تا رصدخانه‌های ژئومغناطیسی حداقل به اندازه چند ده کیلومتر از خطوط ساحلی فاصله داشته باشند (وینرت، ۱۹۷۰).

۲-۲-۳ مخاطرات طبیعی

تحلیل و بررسی تغییرات طولانی‌مدت میدان ژئومغناطیس، مستلزم آن است که این ایستگاه‌های اندازه‌گیری، تاب‌آوری عملیاتی بلند مدت داشته باشند و بتوانند مؤلفه‌های میدان را برای بازه‌های زمانی چندصدساله، ثبت کنند. انتخاب مکان رصدخانه‌ها بدون ارزیابی مخاطرات طبیعی منجر به کاهش پایداری عملیاتی بلند مدت رصدخانه‌ها، عدم یکپارچگی داده‌های آنها و در نهایت از بین رفتن توجیه اقتصادی راه‌اندازی آنها می‌شود. عوامل مخاطرات طبیعی برای مکانیابی رصدخانه‌ها در مناطق مختلف یکسان نیستند؛ این عوامل باید متناسب با زمین‌شناسی محلی، لرزه‌خیزی، شرایط محیطی و چالش‌های زیرساختی هر منطقه تنظیم شوند. اما در نهایت همه آنها در چهار دسته: زلزله، آتشفشان، سیل و رطوبت بالا، زمین‌لغزش و بهمین، طبقه‌بندی می‌شوند. این تهدیدات هم بر زیرساخت

فیزیکی و هم بر کیفیت و تداوم اندازه‌گیری‌های حساس ژئومغناطیسی تأثیر می‌گذارند.

لرزش‌های شدید می‌توانند سازه ساختمان و پایه‌های حساس دستگاه‌ها را تخریب کنند و امکان بازیابی یا کالیبراسیون دقیق را از بین ببرند. مانند آسیب جدی رصدخانه کاکوکا ژاپن در زلزله بزرگ کانتو در سال ۱۹۲۳ (فوجی و ناگامچی، ۲۰۲۲). فوران‌های آتشفشانی شدید نیز قادرند کل یک رصدخانه را زیر خاکستر و مواد آتشفشانی دفن کرده و آن را برای همیشه تعطیل کنند. مثل رصدخانه‌ی مانیلا که پس از فوران کوه پیناتوبو در ۱۹۹۱ کاملاً نابود شد (نیوهال و پانجان، ۱۹۹۶). سیل نه تنها باعث تخریب فیزیکی می‌شود، بلکه رطوبت ناشی از آن موجب خوردگی تجهیزات، اتصال کوتاه و اختلال جدی در اندازه‌گیری‌های الکتریکی نیز ایجاد جریان‌های زمینی ناخواسته و افزایش نوفه در داده‌های می‌شود. زمین‌لغزش و بهمین نیز راه‌های دسترسی به رصدخانه‌ها را مسدود کرده، مانع تعمیرات، نگهداری و بازیابی داده‌ها شده و در نتیجه منجر به تعطیلی موقت و اختلال در جمع‌آوری پیوسته داده‌های رصدخانه می‌شوند (یانکوفسکی و ساکسدورف، ۱۹۹۶).

۳ الگوی توزیع مکانی معیارهای تعیین محل

رصدخانه ژئومغناطیسی در استان تهران

سرشت‌نمایی و طبقه‌بندی معیارهای مکان‌یابی رصدخانه ژئومغناطیسی در بخش قبل، پایه علمی و فنی برای توسعه این ایستگاه‌های اندازه‌گیری فراهم آورده است. این فرآیند با ترکیب داده‌های چند رشته‌ای (ژئوفیزیک، زمین‌شناسی، جغرافیایی و ...) به ایجاد رصدخانه‌ای پایدار و تاب‌آور کمک می‌کند. خلاصه‌ای از این معیارها و طبقه‌بندی آنها در جدول یک ارائه شده‌اند. در این بخش اطلاعات مکانی این معیارها در محدوده استان تهران به تفصیل بررسی می‌شوند.

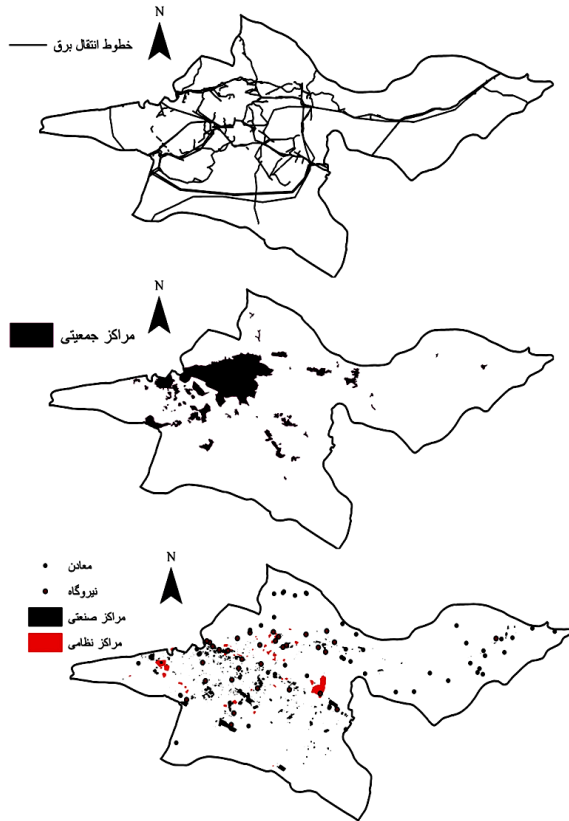
جدول ۱. خلاصه‌ای از لایه‌های اطلاعاتی لازم برای مکان‌یابی بهینه رصدخانه ژئومغناطیسی

ملاحظات	لایه‌های اطلاعاتی مشمول	طبقه بندی لایه‌های اطلاعاتی
	خطوط انتقال در شبکه برق‌رسانی خطوط راه‌آهن خطوط لوله‌کشی مدفون مخابرات رادیویی نرده‌های حفاظ الکتریکی	نوفه‌های EM مصنوعی
اطلاعات مکانی معادن فعال معمولاً از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی استفاده می‌شوند. سایر اطلاعات مکانی از پلتفرم‌ها و ابزارهای مختلف موجود در OpenStreetMap استفاده شده است.	جاده‌ها معادن فعال شهرک‌های صنعتی شهرها روستاها مراکز نظامی	
برای استخراج این اطلاعات از نقشه مغناطیس هوابرد استان تهران (سازمان زمین‌شناسی ایران) و داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده‌اند.	بی‌هنجاری‌های EM پوسته زمین ناهمواری‌های توپوگرافی خطوط ساحلی (رودخانه‌های اصلی و دریاچه‌ها)	نوفه‌های EM طبیعی
	زلزله آتشفشان سیل و رطوبت بالا زمین‌لغزش و بهمن	مخاطرات طبیعی

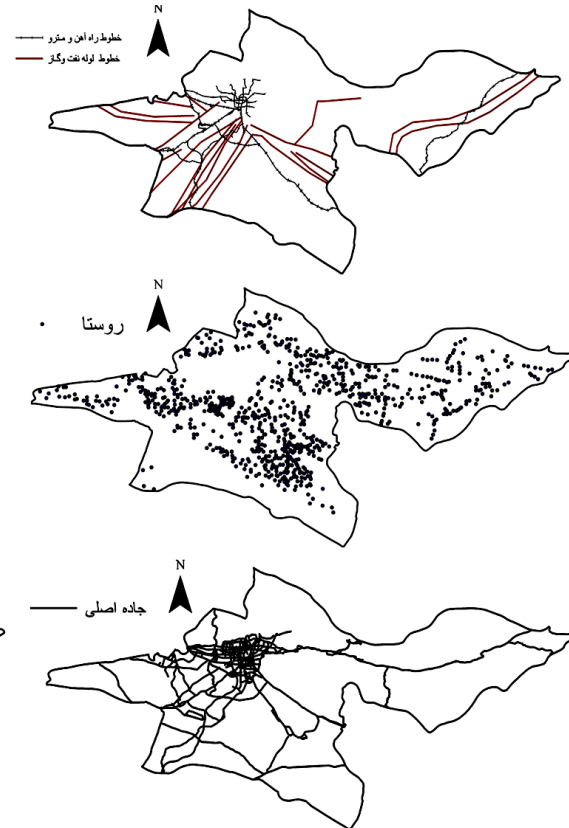
روستاها، معادن فعال، شهرک‌های صنعتی، نیروگاه‌ها و پست‌های تقویت برق. لازم به ذکر است که لایه‌های اطلاعات مکانی این معیارها از مراجع متفاوتی جمع‌آوری شده‌اند. اطلاعات مکانی معادن فعال از بانک داده سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران و سایر اطلاعات از پلتفرم‌های گوناگون (overpas.turbo.eu, export.hotosm.org, geofabrik.de) جغرافیایی برداری، متن‌باز و مشارکتی (Open Source) OSM (Map) گرفته شده است. این داده‌های اولیه با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای گوگل و در محیط نرم‌افزارهای GIS و Google Earth اعتبارسنجی، تلفیق و

از بین گونه‌های مختلف معیارهای مکان‌یابی رصدخانه، ارزیابی سطح نوفه‌های EM مصنوعی برای استان تهران اهمیت مضاعفی دارد؛ چراکه این استان به‌علت پیشرفت‌های صنعتی گسترده، حجم انبوه فعالیت‌های اقتصادی و تراکم جمعیتی بالا در معرض سطح قابل توجهی از نوفه‌های EM مصنوعی قرار دارد. اطلاعات مکانی این گروه از معیارها در شکل ۹ نمایش داده شده است. این لایه‌های اطلاعات مکانی به ده معیار مربوط هستند. این معیارها عبارتند از: خطوط انتقال برق، خطوط لوله‌کشی نفت و گاز، خطوط ریلی راه‌آهن و قطارهای DC مترو، مراکز جمعیتی شامل شهرها و

عاری از آلودگی این نوفه‌ها، بیشتر در حاشیه استان، به‌طور خاص در نواحی جنوب و جنوب غرب آن قرار گرفته‌اند.



ویرایش شده‌اند. با توجه به اینکه شهرک‌های صنعتی و سایر مولدهای مصنوعی نوفه‌های EM در نزدیکی شهر تهران متمرکز شده‌اند، چنین استنباط می‌شود که پهنه‌های



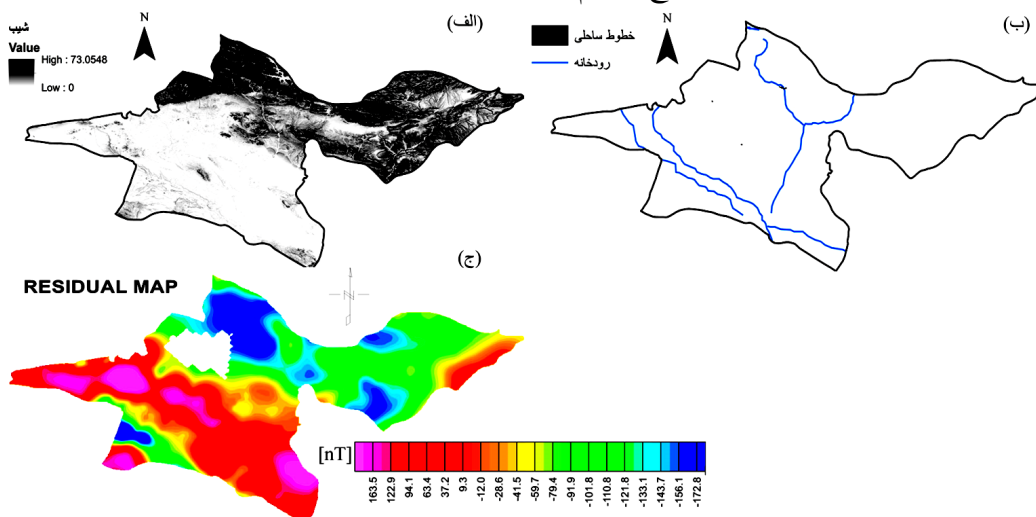
شکل ۹. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به توزیع مکانی مولدهای مصنوعی نوفه‌های EM در محدوده استان تهران.

برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و اطلاعات مکانی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی پوسته در شکل ۱۰ (ج) برگرفته از داده‌های مغناطیس هوابرد، تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران هستند. نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده پس از حذف میدان مغناطیسی هسته با استفاده از مدل IGRF و نیز پس از اعمال فیلتر انتقال به قطب (با تنظیم مقادیر $3/5^\circ$ و $53/3^\circ$ برای به ترتیب زوایای انحراف و میل مغناطیسی) حاصل شده است. بخش‌های واقع در ناحیه البرز مرکزی (شمال استان تهران) و نیز نواحی واقع بر کمان ماگمایی ارومیه-دختر، مقادیر بالای ناهنجاری مغناطیسی را نشان می‌دهند.

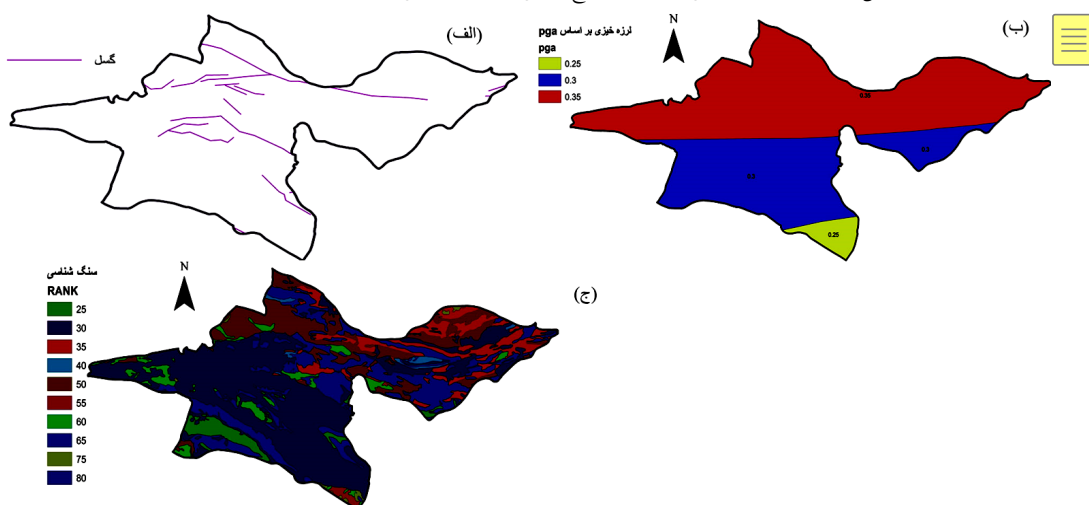
شکل ۱۰ پوشش مکانی مولدهای گوناگون نوفه‌های EM طبیعی را نشان می‌دهد. از آنجا که میزان تجمع بار الکتریکی بر سطوح ناهمواری‌ها با شیب آنها متناسب است (ژیراسک، ۱۹۹۰)، شکل ۱۰ (الف) شیب توپوگرافی را در سرتاسر استان تهران نشان می‌دهد. این نقشه از مدل ارتفاع رقومی مستخرج از مجموعه داده‌های SRTM plus version 3 (کرپین و همکاران، ۲۰۱۶) حاصل شده است. با توجه به قرارگیری استان تهران در دامنه جنوبی رشته کوه البرز، مقادیر کمینه شیب توپوگرافی در جنوب استان تهران مشاهده می‌شود. اطلاعات مکانی رودخانه‌ها و دریاچه‌ها در شکل ۱۰ (ب)

تفکیک و براساس پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر سختی و استحکام شاخصی بین ۱۰ (برای سست‌ترین واحد) تا ۱۰۰ (برای سخت‌ترین واحد) به آنها اختصاص یافته است. در این تحلیل، نواحی واقع بر واحدهای سنگی مستحکم برای تأسیس رصدخانه ژئومغناطیسی مناسب هستند. از مجموع این عوامل نیز قسمت جنوب و جنوب غرب استان تهران که از گسل‌های اصلی دورتر، لرزه‌خیزی پایین‌تر و همچنین حاوی واحدهای سنگی مستحکمی هستند برای تأسیس رصدخانه ژئومغناطیسی مناسب به نظر می‌رسند.

یک رصدخانه ژئومغناطیسی، با توجه به بهره‌گیری از ابزار دقیق و پرهزینه و نیز لزوم ثبات موقعیت مکانی آن برای ثبت داده‌های مورد نیاز در مطالعه تغییرات آهسته میدان ژئومغناطیسی، نمی‌تواند در منطقه‌ای ناامن از دیدگاه زمین‌شناسی یا در پهنه‌ای فعال از نظر لرزه‌خیزی احداث شود. همچنین ضروری است از خطوط گسل فعال نیز فاصله کافی داشته باشد. بر این اساس در شکل ۱۱، نقشه واحدهای سنگ‌شناسی و گسل‌های فعال برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و نیز نقشه پهنه‌بندی لرزه‌ای تهیه شده توسط (زارع، ۲۰۱۲) ارائه شده‌اند. واحدهای سنگ‌شناسی در شکل ۱۱(ج) از هم



شکل ۱۰. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به توزیع مکانی مولدهای طبیعی نوفه‌های EM در محدوده استان تهران.



شکل ۱۱. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به توزیع مکانی مخاطرات طبیعی در محدوده استان تهران.

نتیجه‌گیری

معیارهای تعیین محل رصدخانه ژئومغناطیسی در این پژوهش تشریح و طبقه‌بندی شدند. بدین منظور از بررسی سری‌های زمانی و نیز منحنی‌های طیف توان مؤلفه‌های میدان EM ثبت شده در ایستگاه‌های رصدخانه‌ای متعدد، ساختار نوفه‌های مختل کننده کیفیت و کمیت اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای و نیز منابع به‌وجود آورنده نوفه‌ها تحلیل و بررسی شدند. همچنین مجموعه‌ای از عوامل مخاطرات طبیعی ارزیابی شدند که تداوم اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای را از بین برده و باعث عدم یکپارچگی داده‌های رصدخانه‌ای (ضروری برای مطالعات تغییرات آهسته میدان ژئومغناطیس) می‌شوند. جنبه‌های مذکور در درجه اول براساس مراجع علمی پراکنده در نشریات ژئوفیزیکی بوده است. معیارهای تعیین محل رصدخانه ژئومغناطیسی براساس این مراجع و برحسب عوامل مخرب کیفیت و کمیت داده‌های رصدخانه‌ای در قالب سه گروه طبقه‌بندی و مؤلفه‌های هر گروه به تفکیک تشریح گردید. از مجموع این بررسی‌ها، عوامل کاهنده نوفه‌های EM مصنوعی که به علت پیشرفت‌های صنعتی و تکنولوژیکی بسیار فراگیر شده‌اند، مهمترین گروه از معیارهای مکان‌یابی با بیشترین عناصر تشکیل دهنده هستند. عوامل کاهنده نوفه‌های EM طبیعی و مخاطرات طبیعی در رده‌های بعدی قرار دارند.

در گام بعد، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به توزیع مکانی این معیارها در استان تهران بررسی شدند. اگرچه مناطق در حال توسعه صنعتی و اقتصادی مثل استان تهران از نظر نوفه‌های مخدوش کننده اندازه‌گیری‌های رصدخانه‌ای، بیش از حد نامنظم و بی‌قاعده به نظر می‌رسند اما با کاربرد طبقه‌بندی پیشنهاد شده در این مقاله، بررسی نظام‌مندی از نظر معیارهای مکان‌یابی رصدخانه ژئومغناطیسی در سرتاسر این استان انجام گرفت و قسمتهای جنوب و جنوب غرب این استان برای راه‌اندازی این تأسیسات،

مناسب ارزیابی شد.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مالی بنیاد علم ایران (INSF) برگرفته از طرح شماره «۴۰۴۰۶۶۳۷» انجام شده است.

منابع

- حسین‌زاده گویا، ن.، ۱۳۷۹، بررسی محل‌های مناسب پایگاه‌های جدید مغناطیس‌سنجی در چند شهر ایران، م. فیزیک زمین و فضا، ۲۶(۲)، ۱۷-۲۷.
- Chave, A. D., & Jones, A. G. (Eds.). (2012). *The magnetotelluric method: Theory and practice*. Cambridge University Press.
- Crippen, R., Buckley, S., Agram, P., Belz, E., Gurrola, E., Hensley, S., ... & Tung, W. (2016). NASA DEM global elevation model: Methods and progress. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 125-128.
- Ferguson, I. J. (2012). Instrumentation and field procedures. *The magnetotelluric method*, 421-479.
- Fujii, I., & Nagamachi, S. (2022). History of Kakioka Magnetic Observatory. *History of Geo-and Space Sciences Discussions*, 2022, 1-69.
- GFZ German Research Centre for Geosciences. (2016). Geomagnetic Observatories. *Journal of large-scale research facilities*, 2, A83. <http://dx.doi.org/10.17815/jlsrf-2-1361>
- Hoseinzadeh Gouya, N. (1994). *Iranian National Report on the Geomagnetic Activities in Iran*. Tehran University Press.
- Junge, A. (1996). Characterization of and correction for cultural noise. *Surveys in Geophysics*, 17(4), 361-391.
- Jankowski, J., & Sucksdorff, C. (1996). Guide for magnetic measurements and observatory practice.
- Jiracek, G. R. (1990). Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction. *Surveys in geophysics*, 11(2), 163-203.
- Keshi Afshar, H. (1960). *Iranian National Report on the Geomagnetic Activities in Iran to the XII General Assembly of the International Union of Geodesy and*

- Geophysics in Helsinki, July 1960*. Tehran University Press.
- Khomutov, S. Y. (2017). Magnetic observations at Geophysical Observatory Paratunka IKIR FEB RAS: tasks, possibilities and future prospects. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 20, p. 02002). EDP Sciences.
- Newhall, C. G., & Punongbayan, R. S. (Eds.). (1996). *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. * University of Washington Press.
- Nieckarz, Z. (2016). Imprints of natural phenomena and human activity observed during 10 years of ELF magnetic measurements at the Hylaty Geophysical Station in Poland. *Acta Geophysica*, 64(6), 2591-2608.
- Mandea, M., & Korte, M. (Eds.). (2010). *Geomagnetic observations and models* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Martyn, T., Turbitt, C. W., Baillie, O., Reay, S. J., Clarke, E., Williamson, J., ... & Thompson, V. (2024, November). Relocating Port Stanley Observatory. In *XXth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*.
- Oettinger, G., Haak, V., & Larsen, J. C. (2001). Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif. *Geophysical Journal International*, 146(3), 659-669.
- Padilha, A. L., Alves, L. R., Silva, G. B., & Espinosa, K. V. (2017). Effect of a huge crustal conductivity anomaly on the H-component of geomagnetic variations recorded in central South America. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 58.
- Rung-Arunwan T, Siripunvaraporn W, Utada H . (2017). Use of ssq rotational invariant of magnetotelluric impedances for estimating informative properties for galvanic distortion. *Earth Planets Space* 69(1),80.
- Ryu, K., Oh, S., & Kwon, H. S. (2024). Vehicle noise characteristics in magnetotelluric data and vehicle noise removal using waveform fitting. *Journal of Applied Geophysics*, 230, 105534.
- Santarelli, L., Palangio, P., & De Lauretis, M. (2014). Electromagnetic background noise at L'Aquila geomagnetic observatory. *Annals of Geophysics*, 57(2), G0211-G0211.
- Stagpoole, V. M., Bennie, S. L., Bibby, H. M., Dravitzki, S., & Ingham, M. R. (2009). Deep structure of a major subduction back thrust: Magneto-telluric investigations of the Taranaki Fault, New Zealand. *Tectonophysics*, 463(1-4), 77-85.
- Szarka, L. (1988). Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth—A review. *Surveys in Geophysics*, 9(3), 287-318.
- Wienert, K. A. (1970). Notes on geomagnetic observatory and survey practice. *UNESCO Earth Sciences*, 5.
- Yazdanabadi, M. I., Hojat, A., Ranjbar, H., & Nasab, S. K. (2017). A geographic information system-based site selection experience for the construction of a geomagnetic observatory in Kerman Province, Iran. *Geophysical Prospecting*, 65(S1), 237-245.
- Zare, M. (2012). Development of seismic hazard zoning map for Iran, based on new seismic source determination. In *Proceedings 15th world conference on earthquake engineering, Lisboa, Portugal September* (pp. 24-28).

Characterization and classification of site selection conditions for geomagnetic observatory placement and their spatial distribution in Tehran province

Bahador Shahghobadi¹, Mansoureh Montahaei^{2*}, Hojjatollah Ranjbar³ and Loqman Namaki⁴

¹ M.Sc., Institute of geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Institute of geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Professor, Shahid Bahonar, University of Kerman, Kerman, Iran

⁴ Assistant Professor, Azad university of Sanandaj, Kourdestan, Iran

(Received: 18 February 2026, Accepted: 24 May 2026)

Summary

The site selection process for a geomagnetic observatory placement is essentially a rigorous effort to eliminate or minimize all possible sources contaminating observatory measurements now and for the foreseeable future. The performance of a geomagnetic observatory critically depends on the signal-to-noise ratio of the recorded magnetic field components. All EM noise sources that distort this ratio must be identified and considered in site selection. Site selection for geomagnetic observatories traditionally involves evaluating multiple environmental, geological, and infrastructural factors, but without classification, these criteria are often assessed ad hoc, leading to inefficiencies and suboptimal choices. Classification addresses these by enabling systematic, data-driven prioritization of criteria, reducing subjectivity, and facilitating scalable GIS-based multi-criteria evaluations across large regions.

In this study, we first carry out a detailed review and classification of EM noise sources that affect geomagnetic measurements. These sources are grouped into three main categories: (a) artificial EM noise, (b) natural EM noise related to geological, crustal magnetic anomalies and atmospheric processes, and (c) natural hazards that threaten long-term observatory operation. Artificial EM noise includes power transmission and distribution networks (three-phase high-voltage lines and single-phase medium-voltage feeders), electrified railways and DC metro systems, buried metallic pipelines with cathodic protection, radio and radar communication systems, and electric security fences. For each of these sources, published case studies and theoretical considerations are used to describe the frequency content, dominant field components, amplitude decay with distance, and recommended minimum distances (e.g., tens of meters to several kilometers) required to avoid strong contamination of geomagnetic records. Natural EM noise and geophysical conditions are also analyzed as essential criteria. Topographic variations and associated charge accumulation on surface irregularities, spatial changes in crustal magnetic susceptibility inferred from airborne magnetic data, and large-scale atmospheric and ionospheric phenomena can all deform the EM field and reduce the interpretability of observatory data. Moreover, because one of the main tasks of a geomagnetic observatory is to provide long time series for studies of core dynamics, the site must remain stable over time and be protected from destructive geological processes. Therefore, active faults, seismic hazard zones, mass-movement-prone slopes, and other geohazards in Tehran Province are mapped and incorporated as exclusion or low-suitability zones. In the next step, these conceptual criteria are translated into spatial information layers for Tehran Province. Ten main layers are generated for artificial EM noise sources, including the locations of high-voltage transmission lines, oil and gas pipelines, railways and DC metro lines, cities and villages, active mines, industrial zones, power plants, and transformer substations. These data are compiled from national geological and mining databases and from open, collaborative geographic databases and are validated and edited using satellite imagery and GIS tools. Additional layers representing topographic slope derived from SRTM-based digital elevation models, surface water bodies, crustal magnetic anomalies, lithological units, active faults, and seismic hazard zones are also prepared.

Keywords: Geomagnetic observatory, electromagnetic noise, natural hazard, site selection conditions, Tehran